УДК 629.039.58 + 004.942

О.В. Коваленко
Інститут ядерних досліджень НАН України, Україна
Україна, 03680, м. Київ-680, просп. Науки, 47

ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ВІД ДЖЕРЕЛ ТЕХНОГЕННОГО ТРИТІЮ

O.V. Kovalenko
Institute of Nuclear Research of National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
Ukraine, 03680, Kyiv-680, Science Ave., 47

THE APPROACHES TO MODELING TO ENSURE SAFETY FROM TECHNOGENIC SOURCES OF TRITIUM

А.В. Коваленко
Институт ядерных исследований НАН Украины, Украина
Украина, 03680, г. Киев-680, просп. Науки, 47

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОТ ИСТОЧНИКОВ ТЕХНОГЕННОГО ТРИТИЯ

Розглянуто підходи до моделювання забезпечення безпеки від джерел техногенного тритію при дослідженні просторів пов'язаних різномасштабних моделей стану системи. Досліджено питання розповсюдження тритію та його міграції за харчовими ланцюгами у вигляді моделей багатофазних різнорідних середовищ. За допомогою правил математичної логіки вирішена задача формалізації інформації за різними просторами стану системи.
Ключові слова: залежність, вектор, простір станів, функція.

An approach to modeling security from anthropogenic sources of tritium using a systematic approach in the study of state-space representation of system. We have studied the distribution of tritium and its migration through food chains. In the form of models of multiphase heterogeneous environments is presented. Using the rules of mathematical logic to make to the problem of formalization of information on state-space representations.
Key words: dependence, vector, state-space representation, function.

Рассмотрены подходы к моделированию обеспечения безопасности от источников техногенного трития при исследовании пространств связанных разномасштабных моделей состояния системы. Исследован вопрос распространения трития и его миграции по пищевым цепям в виде моделей многофазных разнородных сред. С помощью правил математической логики решена задача формализации информации по разным пространствам состояния системы.
Ключевые слова: зависимость, вектор, пространство состояний, функция.

З часів ядерних випробувань, що стали найпотужнішим джерелом техногенного тритію, цей ізотоп водню викликає підвищений інтерес науковців. Унаслідок малої енергії випромінювання, тритій не призводить до зовнішнього випромінювання, проте надходить за харчовими ланцюгами в організм людини з їжею та водою. Тритій, що потрапляє усередину клітин організму, спричиняє більші ушкодження, ніж зовнішнє опромінення через те, що продукти розпаду стають джерелами внутрішнього випромінювання, призводять до ушкодження органічних комплексів та ДНК, порушення кровотворення та виникнення злоякісних утворень.

Розвиток атомної енергетики та активізації процесів переробки відпрацьованого ядерного палива призвів до значного збільшення техногенного тритію в гідросфері, атмосфері, у підземних водах.

В Україні діють п'ять АЕС та п'ять регіональних сховищ радіоактивних відходів, серед яких сховища Харківського та Київського спецкомбінатів є найбільшими

вмісниками тритію. Ці сховища були побудовані в середині минулого століття з запасом міцності у 30 років – тобто, на даний момент вони є недостатньо герметичні і з потенційно небезпечних об'єктів перетворилися на небезпечні. А після аварії на Чорнобильській АЕС у оточуюче середовище потрапило близько 10^{14} Бк тритію. Не зважаючи на це, в Україні приділяється досить незначна увага забезпеченню безпеки від джерел техногенного тритію. Хоча, слід зазначити, що й закордонні дослідники мають відносно незначні досягнення у зазначеній сфері: радіобіологічні властивості тритію вивчені недостатньо, оцінки концентрацій тритію у питній воді за даними та методиками ВООЗ, EUATOM та МАГАТЕ, а також науковими публікаціями різних країн світу є протилежними та суперечливими. Більшість існуючих програм моделювання розповсюдження тритію пристосовані до розгляду проблеми радіаційного забруднення тритієм лише у водному та водонасиченому середовищі. Та й ці програми не забезпечують швидкого і точного розрахунку (наприклад, FEFLOW 4.9, Flow3D), бо засновані на моделях масопереносу. Тож, наразі, існує актуальне питання щодо прийняття рішень в умовах невизначеності щодо захисту людей та оточуючого середовища від джерел техногенного тритію.

Метою роботи є дослідження підходів до моделювання забезпечення безпеки від джерел техногенного тритію з метою подальшої розробки інтелектуальних систем прийняття рішень у зазначеній сфері.

За результатами аналізу першоджерел [1-4], можна виділити основні відкриті питання у сфері створення адекватних моделей при загрозі радіоактивного викиду і забруднення територій:

– малодосліджена можливість використання системного підходу при моделюванні події радіоактивного забруднення оточуючого середовища через те, що розповсюдження радіоактивних ізотопів в атмосфері, воді та ґрунті відбувається за різними фізичними законами та розмежовані у просторі та часі;

– важкість формалізації інформації та приведення її узгоджуваних показників через те, що інформація про одну й ту ж саму подію рознесена за різними просторами, що моделюють стан системи;

– щодо питань розповсюдження тритію та його міграції за харчовими ланцюгами, ці питання частково розглядаються у медицині [5], проте не досліджувалися комплексно, через простори стану системи від моменту викиду до впливу на організм людини.

Наявні моделі переносу тритію здебільшого представлені у площині водного середовища та водонасичених ґрунтах і потребують детальних розрахунків по гідрогеології досліджуваного елементу. Наприклад, в процесі аналізу концентрації тритію розробками МАГАТЕ використано спрощений підхід з використанням функції Гріна [6], завдяки чому визначається концентрація тритію, як функція від часу і простору при точковому використанні інжектування тритію. Концентрація тритію при горизонтальній координаті x від початку потоку й глибині z при часі t визначається рівнянням:

$$c(x,z,t) = \int\int g_1(\xi,\tau;x) g_3(\xi,\tau;z) \exp(-\lambda\tau) d\xi\, d\tau \qquad (1)$$

де g_1, g_3 – функції Гріна для горизонтального та вертикального переміщення; l_1, l_2 – емпіричні межі інтеграції по осі x, метрів; τ – час від початку скидання, сек.; ξ – відстань від джерела до елементу $d\xi$ (точки скиду). Крім того, функція g_1 описує необмежене горизонтальне переміщення тритію, а функція g_3 – переміщення тритію у вертикальному напрямку, але має обмеженість за висотою пористопружного насиченого рідиною середовища (ПНРС).

У цьому випадку слід врахувати параметри ґрунтів. Для цього пропонується використовувати ступені зв'язаності між твердою і рідкою фазами ґрунту – граничні випадки ПНРС [7]. Середовище «без зв'язків» буде характеризуватися тим, що рідина вільно циркулюватиме між зернятами твердої фази ґрунту. Прирощення напруги, яке виникає при проходженні пружних хвиль ПНРС, не буде змінювати напруги заповнювача, а відбиватимуться тільки на скелеті середовища (це маловологі середовища піску або пісковику). У середовищі «з довершеними зв'язками» заповнювач не може циркулювати у порах і виштовхуватися з них під тиском динамічної напруги (глини, вапняки). Розрахунки для граничних випадків середовища «без зв'язків» та середовища «з довершеними зв'язками» можуть проводитися на основі моделі пружного однорідного напівпростору з відповідним коефіцієнтом Пуассона матеріалу основи [7].

Запропоноване можна обґрунтувати математичною залежністю взаємодії двох різнорідних середовищ [7]. Так, використовуючи теорію взаємодії багатофазових середовищ, можна представити рівняння руху для твердої та рідкої фази у деякому контурі (тунелі, трубі) без врахування об'ємних сил:

$$\rho_1 \frac{\partial^2 u_i}{\partial \bar{t}^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}^s}{\partial x_i} - W_j$$
$$\rho_2 \frac{\partial^2 U_i}{\partial \bar{t}^2} = \frac{\partial \sigma^f}{\partial x_i} - W_i \qquad (2)$$
,

де u_i, U_i – компоненти векторів переміщення твердої та рідкої фаз відповідно; $\rho_1 = (1-m)\rho_s$; $\rho_2 = mp_f$; ρ_s – густота твердої фази; p_f – густота рідкої фази; m – пористість; σ_{ij}^s – тензор напружень у пружному скелеті (трубі) при проходженні рідини; σ^f – сила, що діє на рідину; t – час; x – координата; W_i – міжфазова сила взаємодії при просування рідини у трубі. Ця сила фільтраційного тертя включає складову, що визначається в'язкими силами на міжфазовій поверхні, та пов'язана з інерційними силами, які обумовлюють прискорення фаз відносно одна одної.

За умов, коли на двохфазну систему взаємодії двох різнорідних середовищ діє ряд сил на межах їх розділу, на межі взаємодії двофазного середовища та твердого тіла, а також взаємодії твердої та рідкої фази середовища, можна представити взаємодію всіх сил на систему наступною моделлю [8]:

$$\dot{T} + \dot{W} + 2D = \int_s (\sigma_{ij}^s \dot{u}_i + \sigma^f \delta_{ij} \dot{U}_i) n_j dS, \qquad (3)$$

де в лівій частині виразу – сума кінетичної та потенціальної енергії двохфазової системи з врахуванням функції дисипації в одиниці об'єму, а поверхневий інтеграл в правій частині – робота всіх сил, що діють на двохфазну систему.

За зазначеною моделлю (3) враховується обмеження тиску в рідкій фазі середовища системи. Це у підсумку дозволяє визначати коефіцієнти зрушення твердої фази відносно рідкої фази, тобто, визначити товщину створення певного шару твердої фази, що виштовхує, наприклад, тритієву воду з-під землі на поверхню, звідки вона потрапляє до рослин та організмів тварин, а також випаровується.

Таким чином, прослідковується процес перенесення ізотопів техногенного тритію, що у результаті аварійної ситуації потрапили у ґрунтові води. З цього моменту слід враховувати, що живий організм мешкає в деякому оточуючому середовищі, на яке впливають різні фактори. Існує багато моделей для розрахунку радіоактивних речовин в атмосфері, ґрунті, воді, але вони, в основному, торкаються міграційних проблем і не спрямовані на оцінку впливу на людину. Для вирішення

задачі застосування системного підходу при дослідженні перенесення радіоактивних ізотопів у різних середовищах пропонується використання просторів пов'язаних різномасштабних моделей стану системи.

Розглядаючи підприємство, що може стати джерелом викиду тритію у оточуюче середовище, можна визначити деяку ділянку площини R, $\Omega \subset$ R, яка представляє собою адміністративно обмежену територію (місто, регіон) , $\vec{r} \subset$ R.

Простори, які моделюють стан системи, можна описати так:

$X = X(\Omega,\ R^n)$ – простір станів підприємства – множина вектор-функцій $x{:}\Omega \rightarrow R^n$, $x(\vec{r}) = (x_1(\vec{r}), \dots x_n(\vec{r}))$;

$Y = Y(\Omega,\ R^m)$ – простір станів забруднення оточуючого середовища – тензорний добуток двох векторів стану середовища та стану людини в цьому середовищі, у підсумку чого відбувається композиція двох функцій: $F: Y \rightarrow N$ та $G: F(Y) \subset N \rightarrow Z$. Їх композицією буде функція $G \circ F: Y \rightarrow Z$, яка може бути представлена рівнянням $(G \circ F)(y) = G(F(y)), y \in Y$ та описана множиною вектор-функцій $y{:}\Omega \rightarrow R^m$, $y(\vec{r}) = (y_1(\vec{r}), \dots y_n(\vec{r}))$;

$V = V(\Omega,\ R^k)$ – простір станів оточуючого середовища, фактично це – результати моніторингу середовища, які можуть бути представлені як множина вектор-функцій $v{:}\Omega \rightarrow R^l$, $v(\vec{r}) = (v_1(\vec{r}), \dots v_n(\vec{r}))$;

$W = W(\Omega,\ R^p)$ – простір небезпечних впливів на оточуюче середовище та людину, які можуть бути представлені як порушення регламенту при оперуванні ресурсами підприємства з виконання поставленого виробничого завдання. Це може бути представлене як множина вектор-функцій $w{:}\Omega \rightarrow R^p$, $w(\vec{r}) = (w_1(\vec{r}), \dots w_n(\vec{r}))$.

Простори, які моделюють можливі операції, що відбуваються у досліджуваній системі, можуть традиційно бути розглянутими як контрзаходи на подію, наприклад, $K(X)$ – простір операцій по відношенню до небезпечного підприємства або окремого підрозділу, де $a = (a_1, \dots a_r) \in K(X)$; $K(V \times Y)$ – простір операцій по відношенню до оточуючого середовища, включаючи тензорний добуток двох векторів стану середовища та стану людини в цьому середовищі, де $b = (b_1, \dots b_s) \in K(V + Y)$; $\varphi \in \Phi$ – простір інших критеріїв, що мають суттєвий вплив на систему, що досліджується. Точки просторів операцій $K(X)$, $K(V \times Y)$ у параметричному вигляді задають вплив, який здійснюється на систему. Компоненти векторів можуть бути представлені числовими або логічними змінними. Приклади означення просторів наступне: $x \in X$ – вплив небезпечного підприємства на оточуюче середовища за кожною компонентою забруднення; $y \in Y$ – розподіл забруднюючих речовин на середовище, на людину. Зв'язки між просторами визначатимуться наступним чином: $F{:}X \times V \rightarrow Y$ визначає стан забруднення середовища за результатами моніторингу стану середовища та стану підприємства; $J{:}X \times Y \rightarrow W$ визначає збиток в залежності від стану середовища та стану об'єкта. Аналогічно будуються й інші зв'язки досліджуваних просторів.

Для визначення відповідності під час дослідження зв'язків просторів стану системи, можна використати підхід до аналізу складних технічних систем [8]. Так, функціонування складної системи характеризується описом ситуацій, які показують стан системи, наприклад, $S_1, S_2, \dots, S_n$, де кожен стан S_n заданий конкретними показниками процесів функціонування системи (Y_n, X_n, U_n), впливом зовнішнього середовища та факторів ризику Ξ_k:

$$S_n = \{(Yn \in Y) \wedge (Xn \in X) \wedge (Un \in U) \wedge (\Xi n \in \Xi)\}, \tag{4}$$

де значення показника в момент часу $T_n \in T^{\pm}$ визначається з відношення:

$$Y_s = \hat{Y}[T_s]; X_s = \hat{X}[T_s]; U_s = \hat{U}[T_s]; \Xi_s = \hat{\Xi}[T_s];$$
$$T_s = \{t_s | t_s > t_{s-1}\} T_s \in T^{\pm}; T^{\pm} = \{t | t^- \le t \le t^+\} \qquad (5)$$
$$Y = (Y_i | i = \overline{1,m}); X = (X_j | j = \overline{1,n});$$
$$U = (U_q | q = \overline{1,Q}); \Xi = (\Xi_p | p = \overline{1,P}),$$

де Y – множина зовнішніх параметрів Y_i, яка утримує всі показники якісного функціонування системи, у тому числі – безпечного функціонування; X – множина внутрішніх параметрів X_j, до складу якої входять конструктивні, технологічні та інші показники; U – множина керувальних параметрів U_q; Ξ – множина параметрів впливу оточуючого середовища Ξ_p та факторів ризику; $\hat{Y}[T_s], \hat{X}[T_s], \hat{U}[T_s], \hat{\Xi}[T_s]$ – множина значень відповідних параметрів в час T_s; $T^{\pm}$ – заданий або прогнозований період функціонування МіС.

Тоді, повертаючись до просторів стану системи, визначення величин критеріїв L можна здійснити за моделлю:

$$L: X \times V \times K(X) \times K(V \times Y) \times K(F) \times K(J) \times W \to \Phi \xrightarrow{U} R, \qquad (6)$$

де R виступає керованим режимом функціонування підприємства, на повернення до якого і спрямовані зусилля осіб, що приймають рішення за ситуацією.

Перехід до цього режиму можна представити відомим функціоналом [8], в якому і враховується значення показників стану системи (5) в конкретний момент часу:

$$\overline{\tilde{R}}^{+}_{tr} : R_{os} \xrightarrow{U_{tr}} R_{sd}, \qquad (7)$$

де $\overline{\tilde{R}}^{+}_{tr}$ – керований режим функціонування, який обумовлений множиною клерувальних параметрів U_{tr} системи управління безпекою, які протягом періоду $\breve{T}^{\pm}_{tr}$ призводять до переходу нештатного режиму R_{os} до штатного режиму R_{sd}.

Тобто, на цьому етапі відбувається перехід до динамічної моделі. Всі наведені простори операцій замінюються на простори, залежні від часу.

Проте, слід зазначити, такий підхід все ж залишає високий відсоток невизначеності, який можна значно зменшити за допомогою застосування правил математичної логіки. У цьому випадку, інформаційна модель управління ситуацією, що виникла на деякому підприємстві, що є джерелом забруднення оточуючого середовища тритієм, може бути описана у вигляді функцій: 1) набір ресурсів для подолання ситуації, що склалася $f(x_0, x_1, x_n)$; технологій подолання ситуацій $f(y_0, y_1, y_0)$; набір рішень для подолання ситуації $f(z_0, z_1, z_0)$. Зазначені функції з позицій алгебри логіки можна записати використовуючи функцію Вебба з визначенням повноти інформаційної моделі в досліджуваному класі подій за теоремою Поста-Яблонського. Використовуючи ряд перетворень за правилами математичної логіки, можна зазначені функції представити у вигляді диз'юнкцій підмножин елементів різних ярусів, що у підсумку дозволить формалізувати наявну інформацію за різними просторами, що моделюють стан системи, та привести її до узгоджуваних показників.

Наведені підходи до моделювання дозволяють за наявності первинних даних перевести аналіз розвитку ситуації на деякому потенційно небезпечному підприємстві з позицій простору станів об'єкта за умов невизначеності до позицій оперування співвідношеннями з відомими складовими, що у підсумку скорочує час вибору оптимального рішення у ситуації, що склалася, мінімум на 5 хв. 1 сек.

Результат отриманий при моделюванні ситуації на потенційно небезпечному об'єкті, який окрім хімічних речовин, має в наявності джерело тритію, у програмному виробі Інститута проблем математичних машин і систем НАН України «Хмара». розрахунки за моделями масопереносу та просторами станів об'єкту проводилися у Microsoft Office Excel. Отриманий результат та наведені підходи можуть бути покладені в основу розробки окремого модуля до програмного виробу «Хмара», що дозволить розраховувати ситуації можливого радіаційного забруднення при техногенній аварії.

В цілому за наведеним можна зробити наступні висновки і узагальнення:

– використання системного підходу при моделюванні події радіоактивного забруднення оточуючого середовища доцільно реалізувати за допомогою дослідження просторів пов'язаних різномасштабних моделей стану системи;

– питання розповсюдження тритію та його міграції за харчовими ланцюгами можуть бути представлені у вигляді моделей багатофазних різнорідних середовищ, які дозволяють описати процеси витиснення радіоактивних ізотопів з ґрунтових вод до коренів рослин та джерел питної води тварин;

– вирішення питань важкості формалізації інформації за різними просторами, що моделюють стан системи, за допомогою застосування правил математичної логіки, дозволяє побудувати інформаційну модель управління ситуацією, що виникла на деякому небезпечному об'єкті.

Література

1. Долін В.В., Пушкарьов О.В., Шраменко І.Ф. та ін. Тритій у біосфері. – К.: Науково-виробниче пілприємство «Видавництво «Наукова думка», 2012. – 224 с.
2. Klement A.W., Jr., et al. Estimates of Ionising Radiation Doses in the United States 1960–2000.–EPA. 1972. 67 p.
3. Jones G. Tritium Issues in Commercial Pressurized Water Reactors. Fusion Science and Technology 54 (2): P. 329–332.
4. Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України : монографія / І.М. Вишневський, Г.П. Гайдар, О.В. Коваленко та ін.; НАН України, Ін-т ядерних досліджень. – К.: Ін-т ядерних досліджень, 2014. – 176 с.
5. Демин С. Н., Телушкина Е. Л. Радиационно–гигиеническая оценка загрязнения внешней среды тритием и дозовые нагрузки на население в районе радиохимического предприятия, //Бюллютень радиационной медицины, 1987. №1. С. 23–28.
6. Eyges L., The Classical Electromagnetic Field, Dover Publications, New York, 1972. – 432 P.
7. Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред / А.Н. Трофимчук, А.М. Гомилко, О.А. Савицкий – К.: Наук. думка, 2003. – 230 с.
8. Згуровський М.З. Системний аналіз. Проблеми, методологія застосування / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К.: «Наукова думка», 2011. – 728с.

Literatura

1. Dolin V.V., Pushkarev O.V., Shramenko I.F. end others. Tritium in biosphere. – Kyiv: Publishing house "Scientific idea" of NASU, 2012. – 224 p.
2. Klement A.W., Jr., et al. Estimates of Ionising Radiation Doses in the United States 1960–2000.–EPA. 1972. 67 p.
3. Jones G. Tritium Issues in Commercial Pressurized Water Reactors. Fusion Science and Technology 54 (2): P. 329–332.
4. Radiating and nuclear technologies in Institute of nuclear researches of NAS Ukraine : Monography / I.M. Vishnevskii, G.P. Gaidar, O.V. Kovalenko end others; NASU, Institute of nuclear researches.– Kyiv: Institute of nuclear researches, 2014. – 176 p.
5. Demin S.N., Telushkina E.L. Radiating-hygienic estimation of pollution of external environment tritium and loading of a doze on the population in area of the radiochemical enterprise // Journal of radiating medicine, 1987. №1. -P. 23–28.
6. Eyges L., The Classical Electromagnetic Field, Dover Publications, New York, 1972. – 432 P.
7. Dynamics of the porous-elastic environments sated with a liquid / A.N. Trofymchuk, A.M. Gomilko, O.A. Savitskii – Kyiv: Publishing house "Scientific idea" of NASU, 2003. – 230 p.

8. Zhurovskii M.Z. The system analysis. Problems, methodology of application / M.Z. Zhurovskii, N.D. Pankratova. – Kyiv: Publishing house "Scientific idea" of NASU, 2011. – 728p.

RESUME

O.V. Kovalenko

The approaches to modeling to ensure safety from technogenic sources of tritium

In given article an approach to modeling security from anthropogenic sources of tritium using a systematic approach in the study of state-space representation of system. For research of distribution tritium in water, ground and air of model are determined. But these models do not allow to estimate influence on the man. In article the approach for an estimation of influence on the man is offered. We have studied the distribution of tritium and its migration through food chains. In the form of models of multiphase heterogeneous environments is presented. Using the rules of mathematical logic to make to the problem of formalization of information on state-space representations. The conclusions are made. The prospects are determined for the further researches.

О.В. Коваленко

Підходи до моделювання забезпечення безпеки від джерел техногенного тритію

У статті розглядаються підходи до моделювання забезпечення безпеки від джерел техногенного тритію. Широко використаний системний підхід при дослідженні просторів пов’язаних різномасштабних моделей стану системи. Зазначено, що існує багато моделей для розрахунку радіоактивних речовин в атмосфері, ґрунті, воді, але вони, в основному, торкаються міграційних проблем і не спрямовані на оцінку впливу на людину. Для вирішення цієї задачі саме і пропонується використання просторів пов’язаних різномасштабних моделей стану системи. Досліджене питання розповсюдження тритію та його міграції за харчовими ланцюгами у вигляді моделей багатофазних різнорідних середовищ. За допомогою правил математичної логіки вирішена задача формалізації інформації за різними просторами стану системи. Зроблені висновки та зазначені перспективи подальших досліджень.

Надійшла до редакції 01.07.2015